

## **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ** **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 616.12.008.331–073.65.78

Е.В. ЖАРКИХ, А.И. ЖЕРЕБЦОВА, И.Н. МАКОВИК, В.В. ДРЁМИН,  
Е.А. ЖЕРЕБЦОВ, Е.В. ПОТАПОВА, А.В. ДУНАЕВ

### **ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ АМПЛИТУД КОЛЕБАНИЙ КОЖНОГО КРОВОТОКА С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОГО ВЕЙВЛЕТ–АНАЛИЗА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОККЛЮЗИОННЫХ ПРОБ**

*В работе показаны возможности применения адаптивного вейвлет–анализа сигналов, регистрируемых методом лазерной доплеровской флоуметрии, при исследовании осцилляций параметров системы микроциркуляции крови до и после проведения окклюзионной пробы. Проведена серия экспериментальных исследований на 28 условно здоровых добровольцах, а также на пациенте ревматологического профиля. На основании полученных данных выявлено, что применение адаптивного вейвлет–преобразования позволяет достоверно оценивать функциональное состояние системы микроциркуляции крови и выявлять различные реакции микрососудистого русла на нагрузочный тест в виде окклюзионной пробы по анализу частотных ритмов модуляции кровотока.*

**Ключевые слова:** *неинвазивная диагностика, лазерная доплеровская флоуметрия, система микроциркуляции крови, окклюзионная проба, спектральный анализ, адаптивное вейвлет–преобразование.*

В настоящее время при диагностике функционального состояния микроциркуляторного русла применяют различные оптические неинвазивные технологии [1]. Наиболее широкое распространение в различных областях медицинской практики получил метод лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). Данный метод основан на неинвазивном зондировании биоткани низкоинтенсивным лазерным излучением и регистрации отраженного и рассеянного излучения от движущихся в диагностическом объеме эритроцитов [2]. Результатом измерений данным методом является регистрация перфузии в виде показателя микроциркуляции (индекс микроциркуляции крови –  $I_m$ ) в перфузионных (относительных) единицах (пф.ед.). Несмотря на все достоинства данного метода, в литературе часто встречаются упоминания о большом разбросе и вариабельности параметров, регистрируемых и рассчитываемых при помощи ЛДФ [3].

Как известно, колебательный процесс, регистрируемый с помощью ЛДФ, является результатом наложения колебаний, обусловленных различными активными и пассивными факторами [4]. Для диагностики состояния системы микроциркуляции крови (МЦК) важно определить вклад различных ритмических составляющих флуксуаций. В настоящее время выделяют несколько частотных диапазонов колебаний кровотока: диапазон 0,005–0,0095 Гц отражает влияние эндотелиального гиперполяризующего фактора [5]; 0,0095–0,02 Гц – осцилляции, обусловленные влиянием эндотелиального оксида азота (NO) [6]; 0,02–0,046 Гц – осцилляции, вызванные низкочастотной ритмической импульсацией симпатических адренергических вазомоторных волокон, непосредственно иннервирующих микрососуды кожи [7, 8]; 0,05–0,069 Гц – колебания, зависящие от влияния сенсорных пептидергических нервных волокон [9]; 0,07–0,15 Гц – осцилляции, обусловленные собственной миогенной активностью миоцитов микрососудов [10]; 0,16–0,18 Гц – осцилляции, вызванные парасимпатическими или симпатическими холинергическими влияниями [11]; 0,2–0,4 Гц – дыхательные волны; 0,8–1,6 Гц – пульсовые волны [12]. Для оценки колебательных процессов в перфузии применяют спектральный анализ, который позволяет неинвазивно оценивать большинство регуляторных факторов. Однако традиционный спектральный анализ дает информацию только об усредненных во времени изменениях колебаний кожного кровотока и не позволяет динамично оценивать процессы, происходящие в системе МЦК непосредственно во время проведения функциональных проб [13, 14].

В качестве провокационных воздействий в настоящее время используют различные функциональные нагрузочные пробы, такие, как окклюзионная проба (ОП) [15], тепловая,

холодовая [16, 17], дыхательная, поструральная, электростимуляционная и др. Они позволяют выявить скрытые нарушения гемодинамики и адаптационные резервы системы МЦК [18].

Целью данной работы явилось оценить возможности применения адаптивного вейвлет–анализа ЛДФ–грамм при проведении окклюзионных проб.

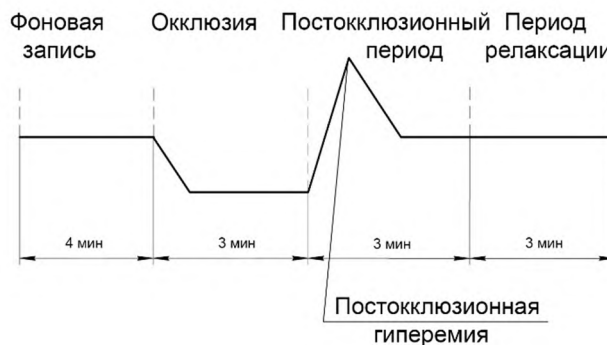
Для реализации поставленной цели проведены экспериментальные исследования, в которых приняли участие 28 условно–здоровых добровольца (средний возраст не превышал 22 года) – 11 парней и 17 девушек.

Окклюзионная проба проводилась путем пережатия на 3 мин правой руки в области предплечья манжетой тонометра таким образом, чтобы создать условия искусственной ишемии тканей и впоследствии наблюдать за восстановлением кровотока. При проведении окклюзионной пробы резервные возможности системы МЦК оцениваются по приросту показателя микроциркуляции крови, происходящему во время постокклюзионной гиперемии. В процессе ишемии в тканях накапливаются метаболические вазодилататоры, обуславливающие возникновение гиперемии в момент декомпрессии [15, 18, 19].

Испытуемый адаптировался к условиям помещения в течение минимум 10 мин. Исследования проводились на 2–х топографо–анатомических участках кожи, расположенных на вентральных поверхностях дистальной и проксимальной фаланг среднего пальца правой руки. Как известно, эти зоны богаты артериоло–венулярными анастомозами (АВА), исключительно зависимыми от симпатической вазомоторной иннервации [18]. Расположение оптических волокон с помощью специальных манжет на пальцах рук во время проведения экспериментальных исследований представлено на рисунке 1, а. Перед началом исследования на предплечье испытуемого надевали манжету механического тонометра CS Medica CS–106 и фиксировали без пережатия артерий, не накачивая. Одно исследование длилось 13 мин и включало непрерывную регистрацию ЛДФ–граммы в течение следующих периодов: начальная (фоновая) запись (НЗ) (4 мин), артериальная окклюзия с давлением в манжете 200–220 мм рт. ст. (3 мин), постокклюзионный период (3 мин) и период релаксации (3 мин). Все эксперименты проводились в положении сидя, правая рука располагалась на специальной подушке на столе на уровне сердца. Временная диаграмма проведения эксперимента приведена на рисунке 1, б.



а



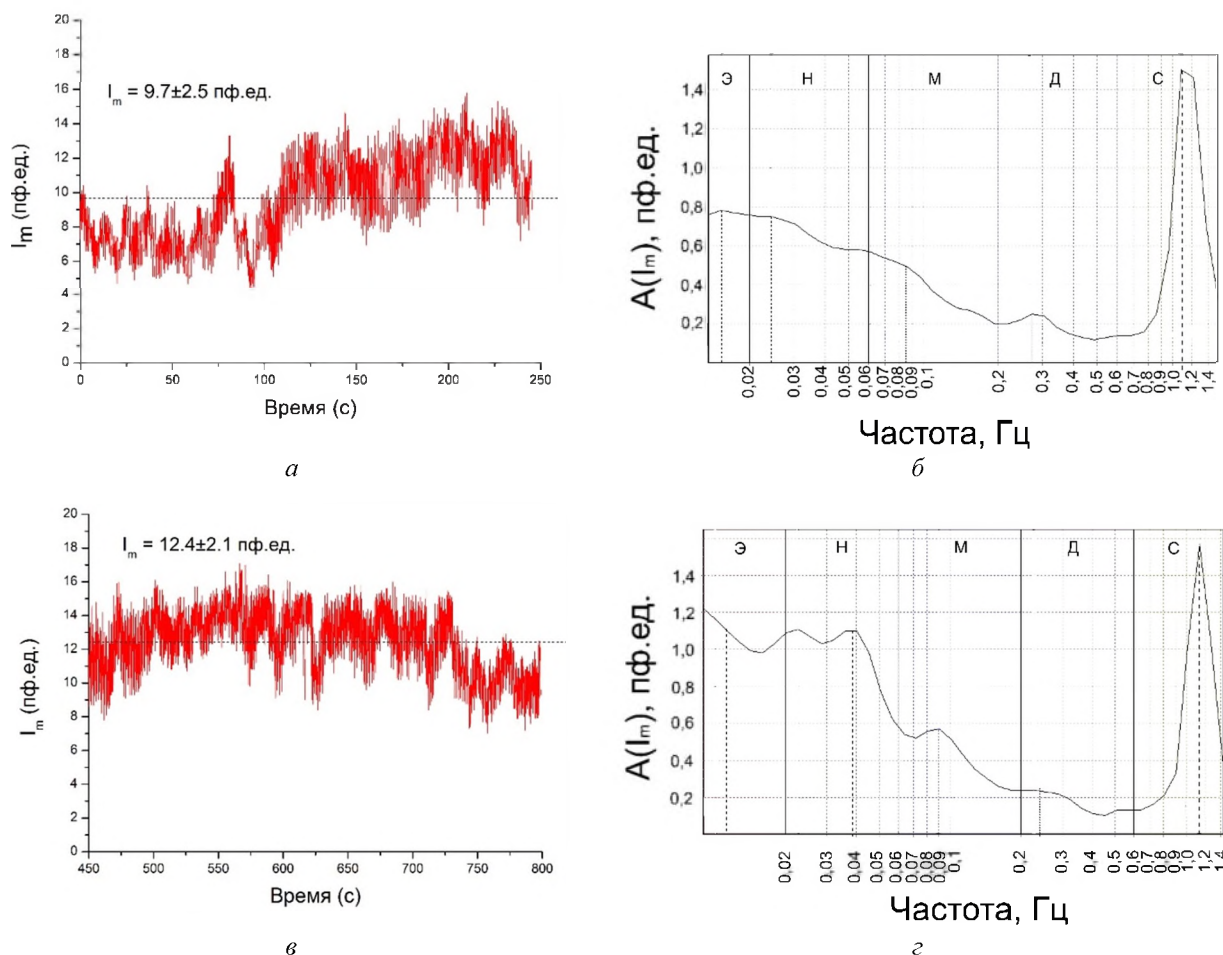
б

**Рисунок 1 – Расположение оптических волокон на пальцах рук добровольца во время проведения исследований (а) и временная диаграмма проведения эксперимента (б)**

В качестве экспериментального оборудования использовался двухканальный лазерный анализатор капиллярного кровотока «ЛАКК–02» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва), представленный на рисунке 1, а. В данном приборе зондирование биоткани осуществляется на длине волны излучения 1064 нм, мощность на выходе волокон до 1,5 мВт.

Аналогичное исследование было проведено на пациенте (мужчина 21 года) ревматологического отделения Орловской областной клинической больницы с диагнозом системной красной волчанки с сопутствующим заболеванием в виде синдрома Рейно. Применяли только 1 канал, оптический зонд в этом случае устанавливали на вентральной поверхности дистальной фаланги среднего пальца правой руки. Общая длительность регистрации показателя микроциркуляции составила 10 мин и включала в себя: фоновую запись – 1 мин, окклюзию – 3 мин, постокклюзионный период – 6 мин.

После проведения экспериментов фрагменты ЛДФ–грамм пред– и постокклюзионных периодов подвергались адаптивному вейвлет–анализу с помощью программы LDF 3.0.2.384 (ООО НПП «ЛАЗМА») которая реализует непрерывное вейвлет–преобразование с использованием в качестве анализирующего вейвлета комплекснозначного вейвлета Морле [14]. С помощью данного вейвлет–анализа определялись амплитудные значения колебаний для 5 основных диапазонов – эндотелиального ( $A_e$ ), нейрогенного ( $A_n$ ), миогенного ( $A_m$ ), дыхательного ( $A_r$ ) и сердечного ( $A_c$ ). На их основе для оценки колебательного компонента микрососудистого тонуса, согласно [18], рассчитывались показатели эндотелиального ( $ET$ ), нейрогенного ( $NT$ ) и миогенного ( $MT$ ) тонуса. По методике [20, 16], основанной на анализе амплитуд колебаний кровотока, рассчитывали показатель шунтирования ( $BI$ ) и нутритивный кровоток ( $I_{mn}$ ).



**Рисунок 2 – Типовой пример фрагментов ЛДФ–граммы и её амплитудно–частотных спектров до (а, б) и после (в, г) проведения окклюзии:**  
 э – эндотелиальные, н – нейрогенные, м – миогенные, д – дыхательные, с – сердечные колебания

На рисунке 2 представлен типовой пример фрагментов зарегистрированной с условно–здорового добровольца ЛДФ–граммы и её усредненные амплитудно–частотные спектры, а на рисунке 3 – её 3D–анализ соответственно до и после проведения окклюзии. Представленные рисунки наглядно демонстрируют преимущества применения 3D–анализа, позволяющего оценить изменения амплитуд колебаний кожного кровотока в каждый момент времени проведения окклюзионной пробы.

Для сравнения амплитуд осцилляций у разных испытуемых и анализа регуляторных механизмов, по мнению некоторых авторов, например [14], более корректно применять величины нормированных амплитуд осцилляций, вследствие чего производился анализ их амплитуд, нормированных на среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) и среднее значение показателя микроциркуляции ( $I_m$ ). Величина  $A/\sigma$  позволяет оценить вклад колебаний определенного частотного диапазона относительно средней модуляции кровотока, в то время как  $A/I_m$  характеризует напряженность регуляции кровотока со стороны отдельных регулятивных факторов [18].



Полученные в результате экспериментальных исследований на 28 условно-здоровых добровольцах данные анализа осцилляций кожного кровотока статистически обработаны и сведены в итоговую таблицу 1. При помощи критерия Манна–Уитни оценено различие значений анализируемых параметров до и после проведения окклюзии.

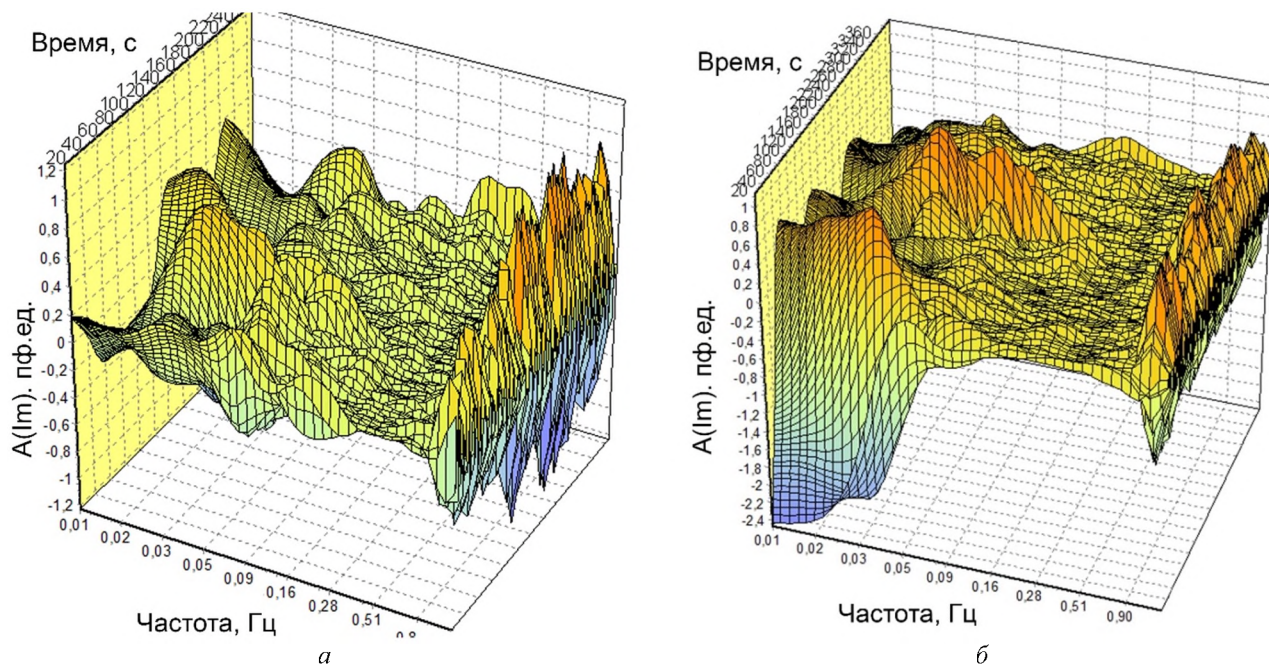


Рисунок 3 – Пример 3D-анализа ЛДФ-граммы до (а) и после (б) проведения окклюзии

Таблица 1 – Результаты анализа колебаний кожного кровотока.

№	Параметр	1 канал		2 канал	
		до окклюзии	после окклюзии	до окклюзии	после окклюзии
1	$I_m$ , пф.ед.	9,4±3,1	10,6±2,9	11,1±3,9	11,3±3,7
2	$I_{mn}$ , пф.ед.	3,6±1,4	3,8±1,6	3,9±1,5	4,1±1,8
3	$A_e$ , пф.ед.	0,9±0,5	1,1±0,6	1,0±0,6	1,3±0,5*
4	$A_n$ , пф.ед.	0,9±0,6	1,0±0,5	1,1±0,6	1,2±0,5
5	$A_m$ , пф.ед.	0,7±0,4	0,8±0,5	0,8±0,5	0,9±0,4
6	$A_r$ , пф.ед.	0,2±0,1	0,2±0,1	0,2±0,1	0,3±0,2
7	$A_c$ , пф.ед.	0,5±0,3	0,5±0,3	0,6±0,2	0,6±0,2
8	$A_e/3\sigma$ , отн.ед.	15,7±4,6	14,7±3,9	17,6±4,6	14,0±3,3*
9	$A_n/3\sigma$ , отн.ед.	16,7±4,7	14,3±4,6	18,6±4,5	12,4±4,1*
10	$A_m/3\sigma$ , отн.ед.	13,4±3,5	10,7±4,0*	14,3±3,5	10,3±4,4*
11	$A_r/3\sigma$ , отн.ед.	4,8±2,5	3,3±1,5*	4,5±2,2	3,3±2,2*
12	$A_c/3\sigma$ , отн.ед.	10,9±5,7	7,9±4,2*	11,8±6,2	6,8±2,4*
13	$A_e/I_m$ , отн.ед.	9,8±9,9	11,5±8,5	12,3±7,8	13,4±6,1
14	$A_n/I_m$ , отн.ед.	9,9±9,0	10,1±6,0	12,9±7,9	11,6±4,8
15	$A_m/I_m$ , отн.ед.	7,6±6,4	7,5±4,3	9,3±4,8	9,4±4,0
16	$A_r/I_m$ , отн.ед.	2,1±1,2	2,1±0,8	2,7±1,6	2,9±1,4
17	$A_c/I_m$ , отн.ед.	5,6±4,5	5,7±4,6	6,4±1,7	5,8±1,3
18	$BI$ , отн.ед.	2,8±0,9	3,1±1,2	3,0±0,7	3,0±1,1
19	$ET$ , отн.ед.	3,2±2,2	3,9±3,4	1,9±0,9	2,0±0,8
20	$NT$ , отн.ед.	2,9±1,9	4,3±4,8	1,8±0,9	2,4±1,5
21	$MT$ , отн.ед.	3,5±1,8	5,2±3,1*	2,4±1,5	3,1±2,4

\*– статистическая значимость различий значений показателей после проведения окклюзии по отношению к значениям до воздействия с  $p < 0,05$  по критерию Манна–Уитни.

Анализ полученных данных выявил различия в адаптационных изменениях у всех добровольцев в обеих областях исследования. Так, сразу после проведения окклюзии наблюдаются статистически значимые различия некоторых параметров. Например, у

большинства добровольцев во 2-й точке (дистальная фаланга пальца) происходит уменьшение нормированных на среднеквадратическое отклонение амплитуд всех пяти исследуемых колебаний, в то время как для 1-й точки (проксимальная фаланга пальца) уменьшение амплитуд колебаний зафиксировано только для миогенного, дыхательного и сердечного диапазонов.

Кроме того, предлагаемая методика позволяет оценивать процессы адаптации системы МЦК в динамике. Например, для одного из волонтеров (девушка, 21 год) в точке 1 на 11 с после окклюзии амплитуда миогенных колебаний ( $A_m$ ) составила 0,8 пф. ед., а к 43 с амплитуда уменьшилась до 0, а затем к 5 мин 42 с увеличилась до 1,3 пф. ед. В точке 2 на 14 с после окклюзии  $A_m$  соответственно составила 0,8 пф. ед., а к 26 с амплитуда уменьшилась до 0, а затем к 3 мин 34 с составила 0,9 пф. ед. Таким образом, в начале постокклюзионного периода наблюдается резкое нарастание миогенных колебаний с последующим их спадом и далее восстановлением до исходного уровня, что может свидетельствовать о резком увеличении метаболической активности тканей исследуемой области сразу после окончания окклюзии и о дальнейшем восстановлении ее нормального функционального состояния [18, 15].

Для другого волонтера (парень, 21 год) в точке 1 через 1 мин после прекращения окклюзии амплитуда миогенных колебаний ( $A_m$ ) достигла своего максимального значения и составила 1,0 пф. ед., а еще через 3 минуты составила 0,2 пф. ед. В точке 2 наблюдаются другие процессы: через 1 мин 23 с после окклюзии максимального значения достигла амплитуда нейрогенных колебаний, а еще через 4 мин она составила уже 0,3 пф. ед., что может свидетельствовать об увеличении количества вырабатываемых NO-эндотелием вазодилататоров после проведения окклюзии, и о восстановлении нормального функционального состояния к концу исследования [6, 16, 18].

На рисунке 4 представлены примеры 3D-анализа результатов исследования кожного кровотока пациента ревматологического профиля с сопутствующим заболеванием в виде синдрома Рейно на пальцах рук.

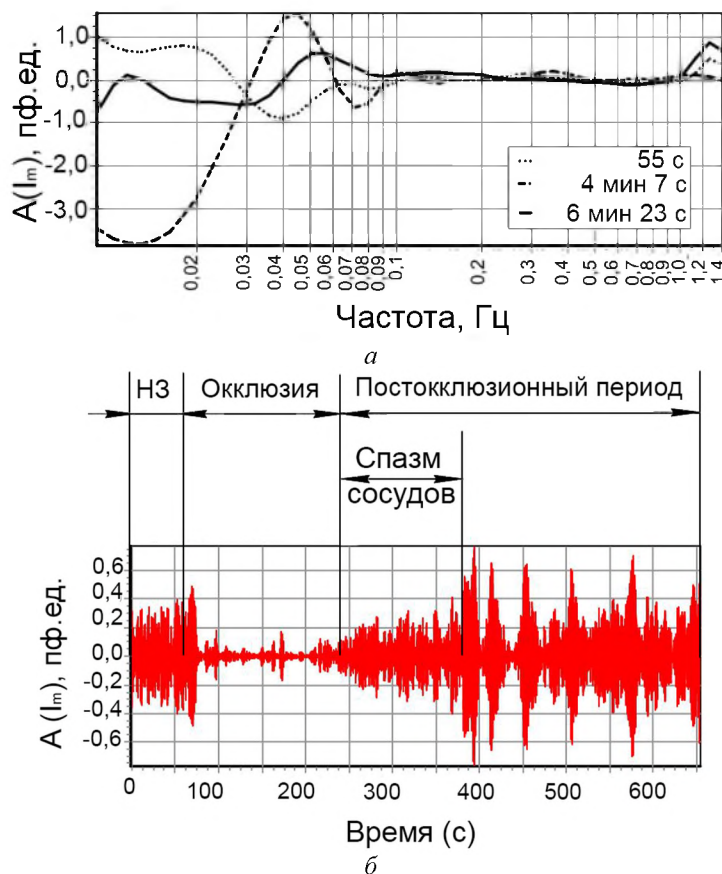


Рисунок 4 – Временные (а) и частотный (б) срезы 3D-анализа колебаний кожного кровотока пациента ревматологического профиля: временные срезы соответственно для фоновой записи (55 с), начала постокклюзионного периода (4 мин 7 с) и в конце периода релаксации (6 мин 23 с); частотный срез для частоты сердечных колебаний 1,133 Гц

Анализ полученных на пациенте данных показал, что после проведения окклюзии амплитуды колебаний кровотока в сердечном частотном диапазоне некоторое время (1 мин 35 с) остаются на сниженном уровне (по сравнению с уровнем колебаний в фоновой записи), что может свидетельствовать о спазме резистивных сосудов и о неадекватности реакции системы микроциркуляции крови на прекращение стрессового воздействия. Кроме того, из полученных во время исследования данных следует, что сразу после прекращения окклюзии наблюдалось резкое увеличение миогенного тонуса, что может свидетельствовать о вазоконстрикторных процессах. В то же время увеличение амплитуд низкочастотных колебаний при отсутствии изменений миогенных осцилляций может свидетельствовать о слабом восстановлении микроциркуляторного русла (снижение адаптационных резервов системы МЦК), а увеличение амплитуд нейрогенных колебаний при уменьшении величины нутритивного кровотока является индикатором активации путей нутритивного кровотока.

Таким образом, применение адаптивного вейвлет-преобразования при анализе ЛДФ-грамм позволяет качественно оценивать динамику изменений амплитуд осцилляций кожного кровотока в исследуемых частотных диапазонах, что повышает информативность функциональной диагностики периферических сосудов при проведении окклюзионных проб. Данный подход может быть использован для выявления возможных нарушений в системе микроциркуляции крови на ранних стадиях заболеваний.

*Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ для ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК» (№310) и внутривузовского гранта Государственного университета – УНПК (ВК–3–2013).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тучин, В.В. Оптическая биомедицинская диагностика: в 2-х т.: учебное издание / В.В. Тучин. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2007. – 559 с.
2. Козлов, В.И. Метод лазерной доплеровской флоуметрии. Пособие для врачей / В.И. Козлов, Э.С. Мач, Ф.Б. Литвин и др. – М. – 2001. – 22 с.
3. Дунаев, А.В. Анализ физиологического разброса параметров микроциркуляторно-тканевых систем / А.В. Дунаев, И.Н. Новикова, А.И. Жеребцова, и др. // Биотехносфера. – 2013. – № 5. – С. 44–53.
4. Stefanovska, A. Wavelet analysis of oscillations in peripheral blood circulation measured by Doppler technique / A. Stefanovska, M. Bracic, H. D. Kvernmo // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 1999. – V. 46. – P. 1230–1239.
5. Kvandal, P. Low-frequency oscillations of the laser Doppler perfusion signal in human skin / P. Kvandal // Microvascular Research. – 2006. – V. 72(3). – P. 120–127.
6. Kvandal, P. Regulation of human cutaneous circulation evaluated by laser Doppler flowmetry, iontophoresis and spectral analysis: importance of nitric oxide and prostaglandines. / P. Kvandal [et al.] // Microvascular Research. – 2003. – V. 65. – P. 160–171.
7. Крупаткин, А.И. Влияние симпатической иннервации на тонус микрососудов и колебания кровотока кожи / А.И. Крупаткин // Физиология человека. – 2006. – Т. 32. – № 5. – С. 95–103.
8. Kastrup J., Buhlow J., Lassen N.A. Vasomotion in human skin before and after local heating recorded with laser Doppler flowmetry. A method for induction of vasomotion / J. Kastrup, J. Buhlow, N.A. Lassen // International Journal of Microcirculation, Clinical and Experimental. – 1989. – V. 8. – P. 205–215.
9. Крупаткин, А.И. Влияние сенсорной пептидергической иннервации на осцилляции кровотока кожи человека в диапазоне 0,047–0,069 Гц / А.И. Крупаткин // Физиология человека. – 2007. – Т. 33. – № 3. – С. 48–54.
10. Крупаткин, А.И. Колебания кровотока частотой около 0,1 Гц в микрососудах кожи не отражают симпатическую регуляцию их тонуса / А.И. Крупаткин // Физиология человека. – 2009. – Т. 35. – № 2. – С. 60–69.
11. Silverman, D.G. Distinction between atropine-sensitive control of microvascular and cardiac oscillatory activity / D.G. Silverman, R.G. Stout // Microvascular Research. – 2002. – V. 63. – P. 196–208.
12. Крупаткин, А.И. Пульсовые и дыхательные осцилляции кровотока в микроциркуляторном русле кожи человека. // Физиология человека, 2008. – Т. 34. – № 3. – С. 70–76.
13. Tikhonova, I.V. Time-amplitude analysis of skin blood flow oscillations during the post-occlusive reactive hyperemia in human / I.V. Tikhonova, A.V. Tankanag, N.K. Chemeris // Microvascular Research. – 2010. – V. 80(1). – P. 58–64.
14. Tankanag, A.V. Application of adaptive wavelet transform for analysis of blood flow oscillations in the human skin / A.V. Tankanag, N.K. Chemeris // Physics in Medicine and Biology. – 2013. – V. 53. – P. 5967–5976.
15. Жеребцова, А.И. Оценка взаимосвязи параметров микроциркуляции крови и кожной температуры при окклюзионной пробе / А.И. Жеребцова // Биотехносфера. – 2015. – № 2. – С.15–21.
16. Новикова, И.Н. Возможности холодовой пробы для функциональной оценки микроциркуляторно-тканевых систем / И.Н. Новикова, А.В. Дунаев, В.В. Сидоров, А.И. Крупаткин // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2015. – № 2 (14). – С.47–55.
17. Бельх, П.М. Контроль эффективности применения ортопедического средства по анализу изменений параметров микроциркуляторно-тканевых систем биотканей / П.М. Бельх, И.Н. Новикова, А.В. Дунаев, Е.В. Шураева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 1(309). – С. 99–107.
18. Крупаткин, А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: руководство для врачей / А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 496 с.
19. Жеребцова, А.И. Метод диагностики функционального состояния периферических сосудов пальцев рук для пациентов ревматоидического профиля / А.И. Жеребцова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 4(312). – С.113–121.

20. Dunaev, A.V. Investigating tissue respiration and skin microhaemocirculation under adaptive changes and the synchronization of blood flow and oxygen saturation rhythms / A.V. Dunaev [et al.] // *Physiological Measurement*. – 2014. – № 35(4). – P. 607–621.

**Жарких Елена Валерьевна**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия  
Студентка кафедры  
«Приборостроение, метрология и сертификация» учебно-научно-исследовательского института информационных технологий, сотрудник студенческого конструкторского бюро биомедицинских инженерных исследований (СКБ БМИИ) научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия»  
Тел. +7 (4862) 41–98–76  
E-mail: loread@mail.ru

**Жеребцова Ангелина Ивановна**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл  
Стажёр-исследователь научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия», соискатель кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация» учебно-научно-исследовательского института информационных технологий  
Тел. +7 (4862) 41–98–76  
E-mail: angelina.zherebtsova@yandex.ru

**Маковик Ирина Николаевна**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл  
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», инженер-исследователь научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия»  
Тел.: +7–4862–41–98–76  
E-mail: i.n\_novikova@mail.ru

**Дрёмин Виктор Владимирович**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия  
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», стажёр-исследователь научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия»  
Тел.: +7–4862–41–98–76  
E-mail: dremin\_viktor@mail.ru

**Жеребцов Евгений Андреевич**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия  
Доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», кандидат технических наук, научный сотрудник научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия»  
Тел.: +7–4862–41–98–76  
E-mail: zherebzow@gmail.com

**Потапова Елена Владимировна**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия  
Доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», кандидат технических наук  
Тел.: +7–4862–41–98–76  
E-mail: elenasweet2007@gmail.com

**Дунаев Андрей Валерьевич**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия  
Ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия», кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел.: +7–4862–41–98–76  
E-mail: dunaev@bmccenter.ru

E. V. ZHARKIKH, A. I. ZHEREBTSOVA, I. N. MAKOVIK, V. V. DREMIN,  
E. A. ZHEREBTSOV, E. V. POTAPOVA, A. V. DUNAEV

## THE POSSIBILITIES OF INVESTIGATING THE OSCILLATION AMPLITUDE CHANGES IN SKIN BLOOD FLOW THROUGH ADAPTIVE WAVELET ANALYSIS DURING OCCLUSION TEST

*The article shows the possibility of using an adaptive wavelet analysis of signals recorded by laser Doppler flowmetry during the study of the oscillation parameters of the system of blood microcirculation before and after the occlusion test. It was conducted a series of experimental studies at 28 apparently healthy volunteers, as well as with the patient of rheumatological profile. Based on these received data we can to conclude that the use of adaptive wavelet transform can reliably assess the functional state of the microcirculation and to identify the different blood flow response to stress test in the form of occlusion test on the analysis of the frequency rhythms modulation of blood flow.*

**Keywords:** non-invasive diagnostics, laser Doppler flowmetry, system of blood microcirculation, occlusion test, spectral analysis, adaptive wavelet filtering.

### BIBLIOGRAPHY

1. Tuchin, V.V. Opticheskaya biomeditsinskaya diagnostika: v 2–kh t.: uchebnoye izdaniye / V.V. Tuchin. – M.: FIZMATLIT. – 2007. – 559 s.
2. Kozlov, V.I. Metod lazernoy dopplerovskoy floumetrii. Posobiye dlya vrachey / V.I. Kozlov, E.S. Mach, F.B. Litvin i dr. – M. – 2001. – 22 s.
3. Dunayev, A.V. Analiz fiziologicheskogo razbrosa parametrov mikrotsirkulyatorno–tkaneyvykh sistem / A.V. Dunayev, I.N. Novikova, A.I. Zherebtsova, i dr. // *Biotekhnosfera*. – 2013. – № 5. – S. 44–53.
4. Stefanovska, A. Wavelet analysis of oscillations in peripheral blood circulation measured by Doppler technique / A. Stefanovska, M. Bracic, H. D. Kvernmo // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* – 1999. – V. 46. – P. 1230–1239.
5. Kvandal, P. Low-frequency oscillations of the laser Doppler perfusion signal in human skin / P. Kvandal // *Microvascular Research*. – 2006. – V. 72(3). – P. 120–127.

6. Kvandal, P. Regulation of human cutaneous circulation evaluated by laser Doppler flowmetry, iontophoresis and spectral analysis: importance of nitric oxide and prostaglandines. / P. Kvandal [et al.] // *Microvascular Research*. – 2003. – V. 65. – P. 160–171.
7. Krupatkin, A.I. Vliyaniye simpaticheskoy innervatsii na tonus mikrososudov i kolebaniya krovotoka kozhi / A.I. Krupatkin // *Fiziologiya cheloveka*. – 2006. – T. 32. – № 5. – S. 95–103.
8. Kastrup J., Buhlow J., Lassen N.A. Vasomotion in human skin before and after local heating recorded with laser Doppler flowmetry. A method for induction of vasomotion / J. Kastrup, J. Buhlow, N.A. Lassen // *International Journal of Microcirculation, Clinical and Experimental*. – 1989. – V. 8. – P. 205–215.
9. Krupatkin, A.I. Vliyaniye sensornoy peptidergicheskoy innervatsii na ostsillyatsii krovotoka kozhi cheloveka v diapazone 0,047–0,069 Gts. / A.I. Krupatkin // *Fiziologiya cheloveka*. – 2007. – T. 33. – № 3. – S. 48–54.
10. Krupatkin, A.I. Kolebaniya krovotoka chastotoy okolo 0,1 Gts v mikrososudakh kozhi ne otrazhayut simpaticheskuyu regulyatsiyu ikh tonusa / A.I. Krupatkin // *Fiziologiya cheloveka*. – 2009. – T. 35. – № 2. – S. 60–69.
11. Silverman, D.G. Distinction between atropine-sensitive control of microvascular and cardiac oscillatory activity / D.G. Silverman, R.G. Stout // *Microvascular Research*. – 2002. – V. 63. – P. 196–208.
12. Krupatkin, A.I. Pulsovyye i dykhatelnyye ostsillyatsii krovotoka v mikrotsirkulyatornom rusle kozhi cheloveka. // *Fiziologiya cheloveka*, 2008. – T. 34. – № 3. – С. 70–76.
13. Tikhonova, I.V. Time-amplitude analysis of skin blood flow oscillations during the post-occlusive reactive hyperemia in human / I.V. Tikhonova, A.V. Tankanag, N.K. Chemeris // *Microvascular Research*. – 2010. – V. 80(1). – P. 58–64.
14. Tankanag, A.V. Application of adaptive wavelet transform for analysis of blood flow oscillations in the human skin/ A.V. Tankanag, N.K. Chemeris // *Physics in Medicine and Biology*. – 2013. – V. 53. – P. 5967–5976.
15. Zherebtsova, A.I. Otsenka vzaimosvyazi parametrov mikrotsirkulyatsii krovi i nakozhnoy temperatury pri okklyuzionnoy probe / A.I. Zherebtsova // *Biotekhnosfera*. – 2015. – № 2. – S. 15–21.
16. Novikova, I.N. Vozmozhnosti kholodovoy proby dlya funktsionalnoy otsenki mikrotsirkulyatorno-tkaneynykh sistem / I.N. Novikova, A.V. Dunayev, V.V. Sidorov, A.I. Krupatkin // *Regionarnoye krovoobrashcheniye i mikrotsirkulyatsiya*. – 2015. – № 2 (14). – S. 47–55.
17. Belykh, P.M. Kontrol effektivnosti primeneniya ortopedicheskogo sredstva po analizu izmeneniy parametrov mikrotsirkulyatorno-tkaneynykh sistem biotkaney / P.M. Belykh, I.N. Novikova, A.V. Dunayev, Ye.V. Shurayeva // *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2015. – № 1(309). – S. 99–107.
18. Krupatkin, A.I. Funktsionalnaya diagnostika sostoyaniya mikrotsirkulyatorno-tkaneynykh sistem: kolebaniya, informatsiya, nelineynost: rukovodstvo dlya vrachey / A.I. Krupatkin, V.V. Sidorov. – M.: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2013. – 496 s.
19. Zherebtsova, A.I. Metod diagnostiki funktsionalnogo sostoyaniya perifericheskikh sosudov paltsev ruk dlya patsiyentov revmatologicheskogo profilya / A.I. Zherebtsova // *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2015. – № 4(312). – S. 113–121.
20. Dunaev, A.V. Investigating tissue respiration and skin microhaemocirculation under adaptive changes and the synchronization of blood flow and oxygen saturation rhythms / A.V. Dunaev [et al.] // *Physiological Measurement*. – 2014. – № 35(4). – P. 607–621.

**Zharkikh Elena Valerievna**  
Prioksky State University, Oryol,  
Russia  
Student of the Department  
«Instrumentation, metrology and  
certification», a member of the  
Student Design Bureau of Biomedical  
Engineering Research (SDB BMER)  
scientific and educational center  
«Biomedical Engineering»  
Ph.: (4862) 41 98 76  
E-mail: loread@mail.ru

**Zherebtsova Angelina Ivanovna**  
Prioksky State University, Oryol,  
Russia  
Early stage researcher of scientific-  
educational center «Biomedical  
Engineering», applicant for doctoral  
degree of the Department  
«Instrumentation, metrology and  
certification» of Educational and  
Research Institute of Information  
Technology  
Ph. +7 (4862) 41-98-76  
E-mail:angelina.zherebtsova@yandex.ru

**Makovik Irina Nikolaevna**  
Prioksky State University, Oryol,  
Russia  
Post graduate student degree of the  
Department «Instrumentation,  
metrology and certification» of  
Educational and Research Institute of  
Information Technology, Engineer-  
researcher of scientific-educational  
center «Biomedical Engineering»  
Ph.: +7-4862-41-98-76  
E-mail: i.n\_novikova@mail.ru

**Dremin Victor Vladimirovich**  
Prioksky State University, Oryol,  
Russia  
Post graduate student degree of the  
Department «Instrumentation,  
metrology and certification» of  
Educational and Research Institute of  
Information Technology, Early stage  
researcher of scientific-educational  
center «Biomedical Engineering»  
Ph.: +7-4862-41-98-76  
E-mail: dremin\_viktor@mail.ru

**Zherebtsov Evgeniy Andreevich**  
Prioksky State University, Oryol,  
Russia  
PhD, Docent of the Department  
«Instrumentation, metrology and  
certification» of Educational and  
Research Institute of Information  
Technology, researcher of scientific-  
educational center «Biomedical  
Engineering»  
Ph.: +7-4862-41-98-76  
E-mail: zherebzow@gmail.com

**Potapova Elena Vladimirovna**  
Prioksky State University, Oryol,  
Russia  
PhD, Docent of the Department  
«Instrumentation, metrology and  
certification» of Educational and  
Research Institute of Information  
Technology  
Ph.: +7-4862-41-98-76  
E-mail: elenasweet2007@gmail.com

**Dunaev Andrey Valerievich**  
Prioksky State University, Oryol, Russia  
Leading Research Fellow of scientific-educational center «Biomedical Engineering», PhD, Docent of the Department  
«Instrumentation, metrology and certification» of Educational and Research Institute of Information Technology  
E-mail: dunaev@bmccenter.ru  
Ph.: +7-4862-41-98-76